

基于 NDVI 的喀斯特水资源遥感定量监测及分析 ——以贵州省为例

贺中华^{1,2}, 陈晓翔¹, 梁虹², 黄法苏³, 赵芳⁴

(1. 中山大学 地理科学与规划学院, 广州 510275; 2. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550001;

3. 贵州省水文水资源局, 贵阳 550002; 4. 贵州省贵阳市白云区职业技术学校, 贵阳 550014)

摘要:喀斯特是一类脆弱的生态环境,水资源是脆弱生态环境的重要组成部分,NDVI 是流域赋水状况及空间分布的重要指标,因此,喀斯特水资源监测是研究脆弱生态环境的重要内容。在贵州省内选择 20 个流域作为研究样区,根据 Landsat TM 的植被光谱特征,利用遥感技术,提取 LNDVI 和 ρ NDVI;利用数学分析方法,建立喀斯特流域水资源监测模型。通过分析得出:① 植被覆盖率是喀斯特流域赋水的重要指标;② 利用地物表观反射率的归一化植被指数(ρ NDVI)对喀斯特流域水资源进行监测,效果更好、精度更高;③ 建立了喀斯特水资源遥感监测模型。

关键词:喀斯特流域;喀斯特水资源;Landsat TM 影像;NDVI;监测预测模型

中图分类号:TV211.13;P208.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)03-0161-05

Quantitative Remote Sensing Monitoring and Analysis of Karst Water Resources Based on NDVI —Taking Guizhou Province as a Case

HE Zhong-hua^{1,2}, CHEN Xiao-xiang¹, LIANG Hong², HUANG Fa-su³, ZHAO Fang⁴

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. School of Geographic and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 3. Department of Hydrology and Water Resources, Guiyang, Guizhou 550001, China; 4. Vocational and Technical School, Baiyun District of Guiyang City, Guizhou 550014, China)

Abstract: Karst is a vulnerable eco-environment. Water resources are important part of the fragile eco-environment. NDVI is the importance index of the Karst Basin water-holding condition and spatial distribution, therefore, to monitor the karst water resources is an important behavior of studying the vulnerable eco-environment. 20 watersheds were selected as the study areas in Guizhou Province in this paper. According to Landsat TM spectral characteristics of vegetation, LNDVI and ρ NDVI were extracted by using remote sensing techniques. The model of karst drainage basin water resources monitoring was established by using mathematical analysis. It could be obtained by the analysis that the vegetation coverage was an important indicator of the karst basin water-holding, the karst basin water resources monitoring by using surface feature apparent reflectance of the normalized difference vegetation index was better results and higher accuracy, and the remote sensing monitoring model of karst water resources was established.

Key words: karst basin; karst water resources; Landsat TM image; NDVI; monitoring model

喀斯特无论在世界上还是我国,都是一类脆弱的生态环境,已引起国内外学术界的深切关注。喀斯特流域是具有特殊的双重含水介质,特殊的地表、地下双重分水岭,独特的地貌—水系结构的地域综合体^[1]。喀斯特水资源是大气降水在喀斯特流域下垫

面再分配的表现,根据喀斯特流域的特征,其水资源可分为地表水资源和地下水资源。影响喀斯特水资源的因素很多,除土地利用类型、岩组类型、地貌类型外,其植被类型也不容忽视。例如高大的乔木和低矮的灌木对减小降水对地表的冲击力不同,不同森林植

收稿日期:2011-09-27

修回日期:2011-11-04

资助项目:贵州省教育厅基金(黔教科 20090039,2006307);贵州省科技厅基金(黔科合 J 字[2010]2026 号);贵州省水利厅基金(KT201010,KT201105,KT200802)

作者简介:贺中华(1976—),男,副教授,博士生,研究方向:环境遥感。E-mail:zhonghuahe@gznu.edu.cn

被通过影响降水在地表的侧向流速、降水在流域下垫面滞流的时间及下渗率,进而影响喀斯特流域的水资源量。目前,衡量流域植被好坏的一个重要指标为植被指数。植被指数(VI)是对地表植被活动的简单、有效和经验的度量,在一定程度上反映流域下垫面的赋水信息。经过近 20 a 的发展,植被指数已有几十种,其中归一化植指数(NDVI)被广泛地应用在全球与区域土地覆盖、植被分类和环境变化等研究领域^[2-9]。对于喀斯特水资源的研究,课题组曾做过相关工作^[10-11],而基于 NDVI 的喀斯特水资源的定量研究,无论在国内还是国外,未曾见有研究报道。本文在贵州省内选取 20 个具有连续 5 a 观测水文数据和遥感资料的典型喀斯特流域,利用遥感技术,从 TM 影像中提取喀斯特流域 NDVI,利用现代数学方法,探讨喀斯特流域水资源与 NDVI 的关系,建立水资源监测、预测模型,并利用 5 个研究样区进行模型检验。

1 数据选取及处理

1.1 水文数据选取

根据贵州省水文总站整编的《贵州省历年各月平均流量统计资料》以及贵州省水文水资源局整编的《贵州省水资源公报》,选其中都处于相同的气候带的 20 个水文断面,时间从 2005—2010 年,流域面积以中小流域为主,目的是为了保证流域下垫面的地质条件能尽可能相同或相近。各流域的 9 月平均径流深见表 3。

1.2 遥感数据选取

数据选用 TM 影像的 2005—2010 年,成像时间分别为每年的 9 月,保证降雨对流域赋水影响较小,保证每个时段研究样区云量小于 30%。

1.3 遥感影像处理及计算

1.3.1 遥感影像预处理

(1) 大气校正。目前,大气校正的方法有很多,其中,大气辐射传输模型是大气校正中精度较高的方法。它是利用电磁波在大气中的辐射传输原理建立的模型来对遥感图像进行大气校正的。本研究采用的 FLAASH 模型是改进的 MORTAN 模型,它不仅可以对高光谱数据进行大气校正,而且还可以对多光谱数据如 Landsat, SPOT, AVHRR, MERIS, IRS 和 ASTER 等数据进行大气校正。

(2) 几何校正。几何校正包括图像对地形图和图像对图像的配准。地形图是国家基础地理信息 1:25 万数据,其坐标为地理坐标、采用克拉索夫斯

基椭圆。影像配准利用多项式中 4 项式,控制点选择 40 个左右,配准精度在 5 个像素内;精度图像对图像配准保证在 0.3 个像素,为了保证光谱信息,重采样时选取最近邻法。

1.3.2 表观反射率计算

(1) 光谱辐射亮度的计算

$$L = \text{Gain} \cdot \text{DN} + \text{Bias} \quad (1)$$

如果没有定标参数 Gain 和 Bias 的资料,某一波段的 L 可以根据式(2)计算。

$$L = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{\text{QCAL}_{\max} - \text{QCAL}_{\min}} \cdot (\text{QCAL} - \text{QCAL}_{\min}) + L_{\min} \quad (2)$$

式中:QCAL——某一像元的 DN 值,即 $\text{QCAL} = \text{DN}$; QCAL_{\max} ——像元可以取的最大值 255; QCAL_{\min} ——像元可以取的最小值。对于 Landsat-7 来说,式(2)^[12-13]可改为式(3)($\text{QCAL}_{\min} = 1$)。

$$L = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{254} \cdot (\text{DN} - 1) + L_{\min} \quad (3)$$

(2) 表观反射率的计算^[13-15]。

$$\rho = \frac{\pi \cdot L \cdot D^2}{\text{ESUN} \cdot \cos \theta} \quad (4)$$

式中: ρ ——大气层顶(TOA)表观反射率(无量纲); π ——常量(球面度 sr); L ——大气层顶进入卫星传感器; D ——日地之间距离。根据表 1,可以推算全年任何一天的日地距离;ESUN——大气层顶的平均太阳光谱辐照度,根据表 2 可查得^[12]。

θ 为太阳的天顶角,地面站提供的头文件给出的是太阳高度角,因此 $\theta = 90^\circ - \beta$ 。另外,可以用式(5)直接求取 $\cos \theta$ ^[16]。

$$\cos \theta = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \quad (5)$$

式中: φ ——地理纬度; δ ——太阳赤纬; h ——太阳的时角。

1.3.3 NDVI 指数的计算 根据植被的反射光谱特征,利用红波段、近红外波段的反射率和其他因子及其组合所获得的植被指数来提取植被信息,且这些波段常包含 90% 以上有关植被的信息。归一化植被指数是广泛使用的一种植被指数,由 Rouse 等人提出^[17]。

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - R}{\text{NIR} + R} \quad (6)$$

式中:NIR——近红外通道反射率; R ——红色通道的反射率。其中, $-1 \leq \text{NDVI} \leq 1$, 负值表示地面覆盖为云、水、雪等,对可见光高反射;0 表示有岩石或裸土等,NIR 和 R 近似相等;正值表示有植被覆盖,且随覆盖度增大而增大。

表 1 随时间变化日地距离(天文单位,D)

日数	距离	日数	距离	日数	距离	日数	距离	日数	距离
1	0.9832	74	0.9945	152	1.0140	227	1.0128	305	0.9925
15	0.9836	91	0.9993	166	1.0158	242	1.0092	319	0.9892
32	0.9853	106	1.0033	182	1.0167	258	1.0057	335	0.9860
46	0.9878	121	1.0076	196	1.0165	274	1.0011	349	0.9843
60	0.9909	135	1.0109	213	1.0149	288	0.9972	365	0.9830

注:日地天文单位距离 $D=1-0.01674 \cos(0.9856 \times (JD-4) \times \pi/180)$; JD 为遥感成像的儒略日(Julian Day)。

表 2 Landsat—7 和 Landsat—5 的大气层顶平均太阳光谱照度 $W/(m^2 \cdot \mu m)$

波段	1	2	3	4	5	7
Landsat—7 ESUN	1969.00	1840.00	1551.00	1044.00	225.70	82.07
Landsat—5 ESUN	1957.00	1826.00	1554.00	1036.00	215.00	80.67

本研究选用 Landsat—7 数据,首先,选用公式(2)计算光谱辐射亮度;其次,选用公式(4)、公式(5),并根据表 1、表 2 计算表观反射率;再次,利用公式(6)计算光谱辐射亮度的 LNDVI、表观反射率的 ρ NDVI,得表 3。

表 3 喀斯特流域研究样区水文数据及 NDVI

序号	县名	水文站名	径流深/mm	LNDVI	ρ NDVI
1	毕节	徐花屯	1.9	-0.3457	-0.6187
2	清镇	鸭池河	89.8	0.4585	0.5969
3	沿河	塘坝	6.2	-0.2846	0.1072
4	普定	三岔河站	87.7	0.4533	0.5881
5	贵阳市	贵阳站	9.8	-0.0949	0.2954
6	金沙	木孔站	79.8	0.4368	0.5838
7	平坝	徐家渡	13.2	0.1632	0.3733
8	贞丰	大田河	64.1	0.3467	0.5098
9	江口	江口	20.3	0.1949	0.4045
10	修文	修文电厂	48.8	0.279	0.4692
11	安龙	坡脚	93.1	0.5881	0.6019
12	普安	草坪头	44.7	0.2563	0.4551
13	正安	正安	49.5	0.3024	0.4721
14	道真	五家院子	33.1	0.2331	0.4529
15	贵定	下湾	21.4	0.2021	0.4114
16	麻江	下司二	54.3	0.3056	0.4918
17	剑河	南哨	31.5	0.2240	0.4496
18	独山	下司	26.2	0.2217	0.4236
19	镇宁	高车	55.1	0.3264	0.507
20	习水	石笋站	19	0.1936	0.4001

注:LNDVI 表示光谱辐射亮度的归一化植被指数; ρ NDVI 表示表观反射率的归一化植被指数。

2 遥感模型建立

2.1 模型原理

假定喀斯特流域某水文断面观测值 Y 和该流域植被指数 X 之间关系可用如下模型表示^[18]:

$$y=b_0+b_1x+b_2x^2+b_3x^3+\epsilon \tag{7}$$

其中, b_0, b_1, b_2, b_3 是未知因素参数; $\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$ 随机变量。为评价回归方程的精度,需对其进行显著性检验,通常用 F 检验。

$$r_{ij} = \frac{\frac{1}{N} \sum_a (x_{ai} - \bar{x}_i)(x_{aj} - \bar{x}_j)}{\sigma_i \sigma_j} = \frac{1}{N} \sum_a x_{ai}^* x_{aj}^* \tag{8}$$

$$F = \frac{S_{\text{回}}/m}{S_{\text{剩}}/(n-m-1)} \sim F(m, n-m-1) \tag{9}$$

式中: $S_{\text{回}} = \sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - \bar{y})^2$, $S_{\text{剩}} = \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2$

因 F 服从自由度为 $(m, n-m-1)$ 的 F 分布,对于指定的 α ,由 F 分布表可查 $F_\alpha(m, n-m-1)$,如 $F > F_\alpha(m, n-m-1)$,则认为回归模型适合该组资料称它为显著的,否则称为不显著即不能使用。

2.2 模型建立

首先,根据表 3,借助 SPSS 和 Matlab 统计软件,利用公式(8)计算喀斯特流域水资源与 NDVI 的相关关系,得到表 4;其次,利用公式(7)建立喀斯特水资源监测、预测模型,模型系数如表 5 所示。图 1,图 2 表示研究样区水资源径流深与 NDVI 的拟合效果。

表 4 径流深与 NDVI 相关系数矩阵

项目	WATER	LNDVI	ρ NDVI
WATER	1	0.857**	0.652**
LNDVI		1	0.866**
ρ NDVI			1

(1) 从表 4 可知,喀斯特水资源与其植被指数相关性都很高,尤其是地物光谱辐射亮度的归一化植被指数,高达 0.857;其次,水资源与地物表观反射率的归一化植被指数的相关性也很高(0.652);另外,反映喀斯特植被覆盖率的 NDVI 之间的相关性也很好(0.866)。

(2) 从表 5 可知,分别由地物光谱辐射亮度的归一化植被指数、地物表观反射率的归一化植被指数来拟合喀斯特水资源,其拟合的效果很好,如图 1—2 所示,拟合度都很高,尤其是地物表观反射率的归一化植被指数来拟合喀斯特水资源,其值达 0.971;利用公式(9)对拟合的效果进行 F 检验,其 F 的最大值达 176.832,最小值为 69.815,均大于给定的临界值 5.29,说明由此建立的模型高度显著。

表 5 模型系数表

模型	b_0	b_1	b_2	b_3	R	R^2	F	F_α	显著性
1	-0.426	99.831	289.028	-262.697	0.964	0.929	69.815	5.29	**
2	10.219	-75.983	110.893	412.439	0.985	0.971	176.832	5.29	**

注: * 表示 $\alpha=0.05$ 时显著; ** 表示 $\alpha=0.01$ 时高度显著; F 是统计值, F_α 临界值。

(3) 根据公式(7), 利用表 5, 其喀斯特流域水资源监测、预测模型可表达为:

$$y_1 = -0.426 + 99.831x + 289.028x^2 - 262.697x^3 \quad (10)$$

$$y_2 = 10.219 - 75.983x + 110.893x^2 + 412.439x^3 \quad (11)$$

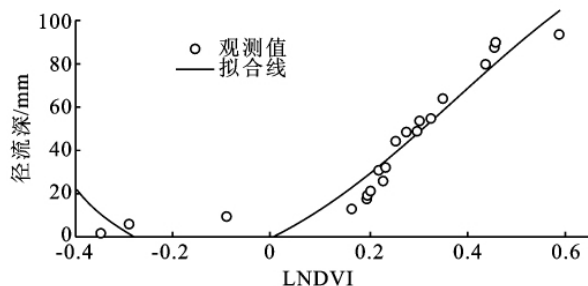


图 1 喀斯特流域研究样区水资源径流深与 LNDVI 拟合效果

综上所述, 在喀斯特地区, 由于地表崎岖, 地下洞隙纵横交错, 水文动态变化剧烈, 地表水渗漏严重, 地下持水保水能力差; 土层薄、肥力低、植被生长困难, 水土流失严重, 形成了独特的、脆弱的喀斯特自然环境, 严重地制约喀斯特流域的持水、供水能力。喀斯特流域具有特殊的双重含水介质, 形成独特的地表—地下水系结构, 因此, 喀斯特流域与正常流域特别是湿润地区常态流域相比, 其流域水资源的形成机制、空间分布规律具有一定的特殊性。流域植被类型及覆盖率将直接影响降雨在喀斯特流域入渗及径流, 即影响降雨在流域空间的再分配, 因此, 喀斯特流域植被指数是喀斯特流域赋水状况的重要性指标。

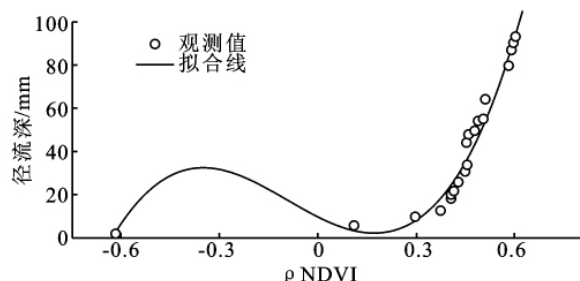
表 6 模型检验结果

序号	县名	水文站名	LNDVI	ρ NDVI	径流深/mm		径流深/mm, 预测值		绝对误差/mm		相对误差绝对值/%	
					实测值		模型 1	模型 2	模型 1	模型 2	模型 1	模型 2
1	铜仁	铜仁	0.3712	0.5299	74.5		63.0200	62.4616	11.4800	12.0384	15.4094	16.1589
2	岑巩	车边	0.1096	0.3712	13.2		13.6415	18.3892	-0.4415	-5.1892	3.3447	39.3121
3	罗甸	石门坎	0.1096	0.3279	9.8		13.6415	11.7679	-3.8415	-1.9679	39.1990	20.0806
4	施秉	施洞	0.3868	0.5414	77.5		66.2289	67.0368	11.2711	10.4632	14.5434	13.5009
5	余庆	余庆	-0.2820	0.2954	7.4		0.2975	8.0817	7.1025	-0.6817	95.9797	9.2122

4 结论与分析

(1) 喀斯特具有特殊的流域下垫面介质结构, 其流域产、汇机制复杂, 流域赋水影响因素多样, 流域植被覆盖率起到重要的作用。

(2) 利用地物光谱辐射亮度的归一化植被指数(LNDVI)和地物表面反射率的归一化植被指数

图 2 喀斯特流域研究样区水资源径流深与 ρ NDVI 拟合效果

3 遥感模型检验

为了评定监测、预测模型的精度, 任选 5 个喀斯特流域作为研究样区, 按上述方法对研究样区遥感影像进行处理, 分别提取 LNDVI、 ρ NDVI, 如表 6 所示, 分别代入模型(10)、(11)进行计算, 并与实测数值对比见表 6。通过计算比较得出, 模型(10)、(11)相对误差值都比较小, 说明用这两个模型对喀斯特流域水资源进行监测、预测, 效果是比较理想的, 且模型(11), 效果更好, 精度更高。从理论上分析, 原始遥感影像的 DN 是未经过任何校正, 包括辐射定标校正, 只是进入传感器中的辐射能的一种数字转换形式, 不能本质地反映地物的辐射特性。 L 和 ρ 都经过了辐射定标校正, 但是, 当 ρ 再经过大气校正后, 它就是地物的反射率, 能本质地反映地物的辐射特性, 因此, 由它构成的 NDVI 植被指数最接近地物的 NDVI。

(ρ NDVI)对喀斯特流域水资源进行监测、预测效果很好, 尤其是利用 ρ NDVI 进行监测、预测, 精度更高。

(3) 适合于喀斯特流域水资源监测、预测数学模型是:

$$y = 10.219 - 75.983x + 110.893x^2 + 412.439x^3$$

通过方差分析和样区检验, 得出很好的预测效果。

参考文献:

- [1] 杨明德, 谭明, 梁虹. 喀斯特流域水文地貌系统[M]. 北京:地质出版社, 1998.
- [2] 何隆华, 储开华, 肖向明. Vegetation 图像植被指数与实测水稻叶面积指数的关系[J]. 遥感学报, 2004, 8(6): 672-676.
- [3] 王福民, 黄敬峰, 唐延林, 等. 采用不同光谱波段宽度的归一化植被指数估算水稻叶面积指数[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2444-2450.
- [4] 杨曦, 武建军, 闫峰, 等. 基于地表温度—植被指数特征空间的区域土壤干湿状况[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1205-1216.
- [5] 李玉霞, 杨武年, 童玲, 等. 基于光谱指数法的植被含水量遥感定量监测及分析[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1403-1407.
- [6] Fabio Maselli¹, Antonio Di Gregorio, Valerio Capecchi¹ et al. Enrichment of land-cover polygons with eco-climatic information derived from MODIS NDVI imagery [J]. Journal of Biogeography, 2009, 36: 639-650.
- [7] Karnieli A, Nurit A, Rachel T, et al. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment [J]. Journal of Climate, 2010, 23(3): 618-633.
- [8] Pu Ruiliang, Gong Peng, Tian Yong, et al. Using classification and NDVI differencing methods for monitoring sparse vegetation coverage: a case study of saltcedar in Nevada, USA[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(14): 3987-4011.
- [9] Thenkabail P S. Inter-sensor relationships between IKONOS and Landsat-7 ETM+ NDVI data in three ecoregions of Africa [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(2): 389-408.
- [10] 贺中华, 梁虹, 黄法苏, 等. 基于 RS 流域枯水资源的判读识别[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2004, 22(2): 36-39.
- [11] 贺中华, 杨胜天, 梁虹, 等. 基于 GIS 和 RS 的喀斯特流域枯水影响因素识别: 以贵州省为例[J]. 中国岩溶, 2004, 23(1): 48-55.
- [12] Chander G, Markham B L. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and post-calibration dynamic ranges [J]. Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(1): 2674-2677.
- [13] Markham B L, Barker J L. Thematic Mapper bandpass solar exoatmospheric irradiances [J]. International Journal of Remote Sensing, 1987, 8(3): 513-523.
- [14] Roderick M, Smith R, Lodwick G. Calibrating long-term AVHRR-derived NDVI imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(1): 1-12.
- [15] Huete A. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1): 195-213.
- [16] Lü S H. Physical Foundation of Remote Sensing [M]. Beijing: Commercial Press, 1981: 206-234.
- [17] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS [J]. Third ERTS Symposium, NASA, 1973.
- [18] 张超, 杨秉赓. 计量地理学基础 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [3] 李军玲, 张金屯, 郭道宇. 关帝山亚高山灌丛草甸群落优势种群的生态位研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(12): 2081-2088.
- [4] 张忠华, 梁士楚, 胡刚. 桂林岩溶石山阴香群落主要种群生态位研究[J]. 林业科学研究, 2009, 22(1): 63-68.
- [5] 曲红, 王百田, 高海平, 等. 黄土区不同配置人工林物种多样性研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 843-848.
- [6] 邢永亮, 余伟莅, 王利兵, 等. 华北落叶松和兴安杨人工林林下植被多样性的研究[J]. 内蒙古林业科技, 2008, 31(1): 8-12.
- [7] 郑翠玲, 曹子龙, 赵廷宁, 等. 浑善达克沙地南缘农牧交错带弃耕地植被的演替规律[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(1): 72-76.
- [8] 魏志琴, 李旭光, 郝云庆. 珍稀濒危植物群落主要种群生态位特征研究[J]. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2004, 26(1): 1-4.
- [9] 毕润成, 尹文兵, 王艳妮. 山西南部脱皮榆种群生态位的研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(7): 1266-1271.
- [10] Weider L J. Niche breadth and life history variation in a hybrid daphnia complex [J]. Ecology, 1993, 74(3): 935-943.
- [11] 王仁忠. 放牧影响下羊草草地主要植物种群生态位宽度与生态位重叠的研究[J]. 植物生态学报, 1997, 21(4): 304-311.
- [12] Silvertown J W. The distribution of plants in limestone pavements: tests of species interaction and niche separation against null hypotheses [J]. Ecology, 1983, 71: 819-820.
- [13] 郭全邦, 刘玉成, 李旭光. 缙云山森林次生演替序列优势种群生态位[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 1997, 22(1): 73-78.
- [14] Walker B. Conserving biological diversity through ecosystem resilience [J]. Conservation of Biology, 1995, 9(4): 747-752.

(上接第 160 页)